

## 【学位論文審査の要旨】

### 1 研究の目的

リニアモータは、電磁力によって直接的に直線駆動力が得られるダイレクトドライブ装置である。リニアモータの応用としては、山梨実験線の超電導磁気浮上式リニアモータカーが有名であるが、鉄道以外の分野においてもダイレクトドライブ化によって、小型化・高速化・高精度化・低騒音化・クリーン化などの技術的要求を解決することを目的としたリニアモータの適用が拡大しており、搬送、工作機械をはじめ、半導体・画像パネル加工機、情報機器、家電機器、輸送機器、医療・福祉機器など、様々な分野で応用されている。

本研究では、搬送や工作機械等の産業用途でよく用いられているリニア誘導モータ (LIM) および永久磁石リニア同期モータ (PMLSM) の特性を高精度に評価・把握するために必要となるモータ定数の算定法に着目している。リニアモータは、原理的には回転形の誘導モータあるいは永久磁石同期モータを軸方向に切り開いて直線状に伸ばしたものであるが、ストロークが有限であること、モータ端部の影響による端効果が生じること、および三相巻線で発生する磁束密度分布の非対称性が生じることなどの理由で、正確な特性評価が困難であり、その解決が求められている。近年の有限要素法による電磁界数値解析技術の発展により、リニアモータ固有の端効果や磁束密度分布の非対称性を考慮したシミュレーションに基づく設計が比較的容易に行えるようになったが、機器製作後の最終的な特性試験では実測による検証が不可欠である。回転形モータは、製造したモータそのもの（実在機器）を用いて特性評価を行う標準的な試験法が確立されているが、リニアモータの場合には、上記の特殊性のため、製作した装置そのままの状態で行うことが困難である。そのため各製造メーカーでは独自に考案した特殊な試験装置や部分的な分解等を行う試験法を採用しているのが現状である。したがって、ユーザが各社のリニアモータの特性を相互に比較・評価することが困難であり、産業応用上の障害となっている。

以上の背景を踏まえて、本研究では、リニアモータの分解や特殊な試験装置を用いることなく、実在機器の状態等で等価回路モデルの回路定数を高精度に計測し、これを用いて多様なリニアモータの特性算定を統一的に行う手法を開発することで、リニアモータの特性試験評価の実用性を向上させることを目的としている。

### 2 研究の方法と結果

本研究では、産業用途で最も大量に使用されているリニア誘導モータ (LIM) と永久磁石リニア同期モータ (PMLSM) を取り上げ、機器を分解・改造することなく、推力特性や電流特性などの代表的特性を算定するために必要となる回路パラメータの測定法を考案し、その妥当性を実機試験によって検証し、その有用性を立証している。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、産業界におけるリニアモータの応用範囲と技術動向、および各種リニアモータの構造的・電気的特徴を整理した上で、代表的な産業用リニアモータであるリニア誘

導モータ（LIM）と永久磁石リニア同機モータ（PMLSM）の実用的な特性算定の重要性を指摘し、本研究の目的を論じている。

第2章では、本研究で対象とする LIM および PMLSM の構造と特徴について整理するとともに、先行研究で提案されている回転円盤負荷試験などの特殊な試験装置による特性試験法の問題点を指摘し、リニアモータの実用的な特性試験法の必要性を論じている。

第3章では、LIM の特性算定に必要な回路定数測定法について論じている。従来の回転形モータの試験法として使用されてきた直流試験法を改良し、新たに磁気ヒステリシスの影響を緩和する2段階電圧印加方式を考案している。これにより LIM の演算子インピーダンス軌跡の計測誤差を従来の  $1/2$ （10%から5%以下）に低減し、LIM の重要な特性定数である各巻線間の非対称な相互インダクタンス値の計測精度を大幅に向上させた。

第4章では、PMLSM に特有のインダクタンス非対称性と、磁気飽和に伴うインダクタンス変化に起因する誘起電圧の高調波成分の影響を踏まえた新たな回路定数測定法について論じている。まず、新たに単相交流試験法を考案し、可動子の位置変動と磁気飽和に起因する各巻線のインダクタンス変化の正確な計測を実現した。さらにインダクタンス変化を考慮した非対称三相回路の数式モデルを考案した。これらを用いて算出した誘起電圧特性や推力特性は、実測結果と誤差数%以内で非常に良く一致することを示した。

第5章では、LIM の三相非対称な回路定数を交流インピーダンス測定により計測する手法について論じている。三相非対称な相互インダクタンスを直交二軸（ $\alpha\beta$ 座標系）で記述する手法に基づいて、各軸の交流インピーダンスの測定値から非対称成分を抽出する手法、およびこれを用いて LIM の駆動電流と推力を正確に算定する手法を考案した。本手法による駆動電流と推力の計算結果は、LIM を改造した円盤形 LIM で計測した値と極めて良く一致しており、LIM の改造を行わずとも正確な特性算定が行えることを実証した。

第6章では、本研究成果を総括するとともに、今後の研究課題について論じている。

### 3 審査の結果

本論文は、これまで機器の改造を行わないと困難であったリニアモータ（特に LIM と PMLSM）の特性試験に関して、実在機器の状態で主要な回路定数を測定する手法を考案することにより、その電流波形や推力特性を高精度に算定出来ることを示している。本論文を構成する技術要素については、厳正な査読を経て権威ある学術雑誌に掲載され一般に公開されている。これら一連の成果は、多様なリニアモータに対して統一的な特性評価手法になり得るとともに、これまでリニアモータの改造を行わなければ困難であった特性評価を可能にするという点で、学術的価値に加えて産業応用の点でも極めて有益な知見を与えている。以上から、本論文は博士（工学）の学位を授与するに十分価値あるものと認められる。

### 4 最終試験の結果

本学の学位規定、および電気電子工学専攻の申し合わせに従って論文審査会を開催して、

専門分野に関する筆答および口頭の試問を行うと共に、論文内容について慎重に審査を行った。また、本論文に関する公開の発表会を開催し、学内外からの多数の出席者を得て多角的な質疑・討論を行った。その結果、申請者は論文内容および専門科目・外国語に関して、博士（工学）としての十分な学力があることを確認した。以上の結果を総合的に考慮し、慎重に審議した結果、合格と判定した。